

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360409

研究課題名(和文) トカマクプラズマにおける乱流非線形エネルギー移送の空間非対称性の研究

研究課題名(英文) Study of spatial asymmetry of nonlinear energy transfer in tokamak plasma turbulence

研究代表者

永島 芳彦 (Nagashima, Yoshihiko)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：90390632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：トカマクや直線プラズマ装置において、プラズマ構造の空間非対称性に大きく寄与すると考えられる非線形エネルギー移送の空間非対称性を解明するため、各種揺動データを取得するプローブ(強磁場側プローブ、ロゴスキープローブ、複合静電プローブ、多チャンネルプローブ)の開発を成功させた。また、膨大なデータを解析するコンピューターリソース(ワークステーション、クラスタシステム)を整備し、実験によって得られた膨大なデータを解析した。トカマクの解析では、非線形結合度の空間非体操性の兆候が見られたが、非線形エネルギー移送の非対称性を結論づけるには、今後の実験解析の精度を詰める必要がある。

研究成果の概要(英文)：The aim of the project is to clarify spatial asymmetry of nonlinear energy transfer function in plasma turbulence which could contribute spatial asymmetry of plasma structure in tokamaks and linear plasma devices. For the purpose, a number of diagnostic probes (high-field side probe, Rogowski probe, composite Langmuir probe, and multi-channel probes) were developed successfully. In addition, computational resources such as a work station and PC cluster were provided to analyze a large amount of data obtained in experiments. In an analysis on the tokamak data, a sign of spatial asymmetry of nonlinear couplings was found. However, we also found that higher precision in experiment and data analysis is required to conclude the asymmetry of nonlinear energy transfer function, which is left for the future tasks.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：トカマク 直線プラズマ装置 非線形エネルギー移送 バイスpekトル 空間非対称性 強磁場側プローブ ロゴスキープローブ プラズマ乱流

### 1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマ研究では、乱流輸送の物理解明とその制御法の開発は最重要課題の一つである。磁場閉じ込めプラズマの径方向輸送量は衝突拡散による輸送よりも 1-2 オーダー程度高く、異常輸送と呼ばれている。その原因として、プラズマ中の乱流による輸送が最も有力な候補となっており、その物理解明とその制御法は喫緊の研究課題である。そのような背景のもと、国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画の予測に関連し、帯状流と乱流間の非線形結合など、時空間スケールの異なる揺らぎの混在する多スケール乱流中の非線形過程を通じたエネルギー伝達の重要性が飛躍的に高まり、乱流研究のパラダイムシフトが発生した。そのような乱流研究の潮流で、申請者は九州大学の特別推進研究「乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究」に参加し、直線プラズマを用いてドリフト波乱流—帯状流混合系の非線形結合に関する実験研究を世界的に牽引した。次のステップとして基礎プラズマ実験の知見を燃焼プラズマ研究に生かし、トカマクプラズマへの応用が想定された。トカマクプラズマは同一磁気面でポロイダル非対称な磁場強度勾配を持ち、プラズマがポロイダル非対称性を持つことは古くから指摘されていた。しかし、揺動場の等圧面上の非対称性が定常維持される物理機構の実験解明は全く未開拓である。申請者らは、多スケール乱流の研究を進める過程で、乱流の定常・飽和状態を理解するには中間スケール揺動を媒介とした非線形エネルギー移送の考慮が不可欠との着想を得た。

### 2. 研究の目的

第一に、再現性のあるトカマク・直線プラズマ放電を対象とし、球状トカマクでは最外殻磁気面、直線プラズマではプラズマ境界より小半径方向少し内側の広範な領域において乱流揺動を観測し、揺動スペクトル、乱流揺動モードの強度、波数、浮遊電位揺動とイオン飽和電流揺動間の位相差、磁場揺動強度を分析し、不安定モードの同定と同時に、それらの等圧面上の非一様性 (特にポロイダル断面の非一様性、揺動のバルーニング構造) の実体解明に資する。

第二に、浮遊電位やイオン飽和電流・磁場揺動の膨大なデータを解析するコンピュータを整備し、詳細な線形・非線形揺動解析を各観測点で実施し、乱流揺動や中間スケール揺動の遠距離相関、および揺動間の非線形エネルギー移送関数の強度と符号の観測点による相違を明らかにする。

第三に、観測する揺動パラメータを増強し、電流揺動を評価するためのログスキープローブと、電子温度揺動と正確なポテンシャル揺動計測を目指した高速掃引電子温度測定法を開発する。

### 3. 研究の方法

研究計画・方法では3ステップを想定し、トカマクにおける強磁場側プローブの新設と、トカマク及び直線プラズマの既存プローブの改造、揺動の観測と線形・非線形解析法の適用、ログスキープローブや高速電子温度揺動計測の整備と揺動観測、の順に実施する。は本研究に必要な観測器の準備に相当し、観測対象の揺動場はイオン飽和電流、浮遊電位、磁場揺動である。は実験の遂行とデータ取得・分析に相当する。高精度の揺動解析に必要な膨大なデータ取得と、線形・非線形スペクトル解析を実験データに適用する。は観測対象の揺動場を電流・電子温度・空間電位に拡張し、揺動研究の高精度化を図る。

### 4. 研究成果

平成23年度は、弱磁場側プローブによる研究、特に既存プローブによる基礎データ取得や弱磁場側のプローブ設計を先行させた。まず、再現性のある TST-2 プラズマ放電を対象に、既存のプローブを用いて弱磁場側のスキャンを丹念に行った。そのデータを詳細に分析して、TST-2 プラズマの周辺乱流の基礎データを得た。データ分析の結果、10 kHz 程度のコヒーレント周波数を持つ磁気流体不安定性と、70 kHz 程度のバンド幅が広い乱流揺動が観測され、両者間の非線形結合が観測されかつ空間点によって異なる結果を得、両者の間に何らかの非線形エネルギー流の存在が示唆され、その結果は電気学会の論文誌に掲載された。膨大な実験データが得られたことから、データ分析用 PC を導入し、高スペックの CPU・メモリにより計算時間の短縮に成功した。一方、ログスキープローブの設計を開始し、微小なログスキープローブによって電流分布と電流の揺動による拡散の同時観測を目指すため、ログスキープローブのサイズや必要なアンプのゲイン、静電・電磁シールド効果などの基礎実験を実施し、設計方針の大枠が固まった。

平成24年度は、まず球状トカマク装置の周辺乱流の基礎データをアメリカ物理学会の年次大会にて発表した。一方、同装置における実験の進捗について、2種の測定器を新設・改造して初期データを得た。一つは2次元駆動可能な複合ラングミュアプローブ (磁場揺動の計測も可能)、もう一つはプラズマ中の局所電流計測用のログスキープローブである。それぞれの成果をプラズマ・核融合学会年会や原子力機構若手研究会にて発表した。次に、直線プラズマ装置における業績として、既存データの解析を行い、ヨーロッパ物理学会での発表や EFTSOMP 国際会議における招待講演 (いずれもスウェーデンストックホルム)、フランスナンシー大学における招待講演を行った。また、直線プラズマ装置における実験の進捗は、多点プローブの整備・若干の改良を行った。特に、プローブの計測精度 (クロストークの除去など) を高め

るための仕様を詰め、日本物理学会で発表した。また仕様策定のノウハウ（クロストーク除去の技術など）が東大でのプローブ改造に生かされ、2か所の実験装置での実験の相乗効果が得られた。さらに、多点プローブから得られる膨大な実験データからさらに深い知見を得るための、データ収集システムとPCクラスタシステムの必要性が判明し、それらを整備した。

平成25年度及び平成26年度は、まず球状トカマク実験では、複合プローブにおいて本格的な実験を開始した。すべてのプローブにおいて、高速電圧掃引法を試験し、静電ポテンシャル揺動データを用いてエネルギー移送関数であるレイノルズ応力を求めた。また、ポロイダル・トロイダルフロー計測との比較を行った。一方、強磁場側プローブを導入し、ガスパフ位置を変更した場合の強磁場側における電子温度の測定結果に差がないことを見出した。さらに、電流計測用ロゴスキープローブの開発が進捗し、電流の揺動計測の可能性を広げた。直線プラズマ装置では、非線形エネルギー流測定用の空間分解能を向上させたプローブアレイを整備し、シールド性能を向上させた。一方、正確な静電ポテンシャルの変動をとらえるため、高速電圧掃引法を適用した結果局所的な電子温度揺動・密度揺動・ポテンシャル揺動の計測に成功し、特にポテンシャルの動的応答の実測が可能となった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6件)

- A) Masateru Sonehara, Yoshihiko Nagashima et.al., Fluctuation Measurement Across the Broad Range of the Low-field Side Edge Plasmas in the TST-2Spherical Tokamak, IEEJ Fund. Mater. 132 (2012) 499-504.
- B) 永島芳彦, 球状トカマク研究の進展 - 核融合エネルギー開発に向けて - 2.5 球状トカマク改善閉じ込めプラズマにおける乱流揺動研究, J. Plasma Fusion Res. 88 (2012) 740-746
- C) 永島芳彦, 荒川弘之, プラズマ乱流実験の新展開 4.乱流素過程の詳細計測について, 8 (2012) 315-321
- D) Hirokazu FURUI, Yoshihiko NAGASHIMA, Yuich TAKASE, Akira EJIRI, Hidetoshi KAKUDA, Masateru SONEHARA, Takuya OOSAKO, Naoto TSUJII, Junichi HIRATSUKA, Kazuhiro IMAMURA, Takuma INADA, Keishun NAKAMURA, Ayaka NAKANISHI, Takahiro SHINYA, Hiro TOGASHI, Shintarou TSUDA, Takuma WAKATSUKI and Takashi YAMAGUCHI, Development of a Local Current Diagnostic using a Small Rogowski Coil for a Spherical Tokamak Plasma in TST-2, Plasma Fusion Res., 9 (2014) 3402078-1-4
- E) H. Furui, Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, M. Sonehara, T. Oosako, N. Tsujii, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Shinya, H. Togashi, S. Tsuda, T. Wakatsuki and T. Yamaguchi, Local current density measurement using a Rogowski probe in Tokyo Spherical Tokamak, Rev. Sci. Instrum., 85 (2014) 11D813-1-4
- F) Yoshihiko Nagashima, Shigeru Inagaki, Akihide Fujisawa, Hiroyuki Arakawa, Takuma Yamada, Yudai Miwa, Tatsuya Kobayashi, Sanae-I. Itoh, and Kimitaka Itoh, Observation of Parallel Force Balance for Drift Wave Fluctuation by a Fast Voltage Sweeping Method in a Linear Plasma, J. Phys. Soc. Jpn 84 (2015) 063501-1-3
- [学会発表](計 20件)
- G) Y. Nagashima, et al., Non-Gaussian properties of global particle and momentum fluxes driven by turbulence in a linear plasma, American Physical Society Division of Plasma Physics, 2011年11月15日, Salt Palace Convention Center, Salt Lake City, UT, USA
- H) 曾根原正晃, 永島芳彦他. TST-2 球状トカマクにおける周辺揺動計測, プラズマ科学のフロンティア 2011年9月8日 核融合科学研究所, 曾根原正晃, 永島芳彦他.
- I) 曾根原正晃, 永島芳彦他, Two-dimensional fluctuation measurement of the edge turbulence in the TST-2 spherical tokamak, Plasma Conference 2011 2011年11月23日 石川県立音楽堂
- J) Y. Nagashima, S. -I. Itoh, S. Inagaki, S. Oldenburger, T. Kobayashi, K. Kawashima, N. Ohyama, Y. Tobimatsu, S. Yamada, T. Yamashita, et.al., Progress towards understanding of dynamical interactions between global fields and turbulence nonlinear force in laboratory plasmas, EFTSOMP 2012, Workshop on Electric Fields, Turbulence and Self-Organisation in Magnetized Plasmas (招待講演), 2012年07月09日~2012年07月10日, Sheraton Stockholm Hotel, Stockholm, Sweden
- K) 永島芳彦, Progress towards

understanding of dynamical interactions between global fields and turbulence nonlinear force in laboratory plasmas, 乱流揺動研究会, 2012年12月05日~2012年12月05日, 九州大学筑紫地区

- L) Y. Nagashima, S. I. Itoh, S. Inagaki, S. Oldenburger, et.al., Global measurement of Reynolds stress in cylindrical linear plasmas, 39th EPS Conference & 16th Int. Congress on Plasma Physics, 2012年07月02日~2012年07月06日, Stockholm, Sweden
- M) Y. Nagashima, et.al., Progress towards understanding of dynamical interactions between global fields and turbulence nonlinear force in laboratory plasmas, Seminar talk (招待講演), 2012年11月05日~2012年11月06日, Nancy, France
- N) 永島芳彦, 伊藤早苗, 稲垣滋, 小林達哉, 山下哲生, 山田宗太郎, 大坪聡, 柿川伸介, 田北正智, 三輪祐大, 満園友宏, 藤野博充, 佐々木真, 糟谷直宏, 矢木雅敏, 藤澤彰英, 伊藤公孝, PANTAにおける高空間分解能レイノルズ応力プローブの開発, 日本物理学会 2012年秋季大会, 2012年09月18日~2012年09月21日, 横浜国立大
- O) 曾根原正晃, 永島芳彦, 他, TST-2 球状トカマク装置におけるフロー及びプラズマ乱流構造計測, 第16回若手科学者によるプラズマ研究会, 2013年03月04日~2013年03月06日, 日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所,
- P) 曾根原正晃, 永島芳彦, 他, TST-2 球状トカマク装置におけるプラズマ周辺部乱流構造の計測, プラズマ・核融合学会 第29回年会, 2012年11月27日~2012年11月30日, クローバープラザ(福岡県春日市)
- Q) 古井宏和, 永島芳彦, 高瀬雄一, 江尻星, 角田英俊, 曾根原正晃, 大迫琢也, 加藤邦彦, 新屋貴浩, 富樫央, 中西綾香, 橋本貴博, 平塚淳一, 山口隆史, 若月琢馬, TST-2 におけるプラズマ電流分布計測用の小型ロゴスプローブ開発, プラズマ・核融合学会 第29回年会, 2012年11月27日~2012年11月30日, クローバープラザ(福岡県春日市)
- R) H. Furui, Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, M. Sonehara, T. Oosako, N. Tsujii, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Shinya, H. Togashi, S. Tsuda, T. Wakatsuki, and T. Yamaguchi, Local current density

measurement using a Rogowski probe in the TST-2 spherical tokamak, 20th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, 2014年06月01日~2014年06月05日, Atlanta, GA, USA

- S) 古井宏和, 永島芳彦, 曾根原正晃, 高瀬雄一, 江尻星, 辻井直人, 山口隆史, 新屋貴浩, 富樫央, 今村和宏, 稲田拓真, 津田慎太郎, 中村京春, 竹内敏洋, 中村建大, 本間寛人, 矢嶋悟, 吉田裕亮, ロゴスプローブを用いた電流分布計測, ST研究会「球状トカマク炉のための非誘導電流駆動等の要素技術の開発」, 2014年08月04日~2014年08月05日, 核融合科学研究所、土岐
- T) H. Furui, Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, M. Sonehara, T. Oosako, N. Tsujii, J. Hiratsuka, H. Homma, K. Imamura, T. Inada, K. Nakamura, K. Nakamura, T. Shinya, T. Takeuchi, H. Togashi, S. Tsuda, T. Wakatsuki, S. Yajima, T. Yamaguchi and T. Yoshida, Local current density profile measurement using a Rogowski probe in the TST-2 spherical tokamak, 7TH JAPAN-KOREA SEMINAR ON ADVANCED DIAGNOSTICS FOR STEADY-STATE FUSION PLASMAS, 2014年08月17日~2014年08月20日, Rubino Horikawa Kyoto, Kyoto, Japan
- U) Hirokazu Furui, Yoshihiko Nagashima, Masateru Sonehara, Yuichi Takase, Akira Ejiri, Naoto Tsujii, Takashi Yamaguchi, Takahiro Shinya, Hiro Togashi, Takuma Inada, Kazuhiro Imamura, Shintaro Tsuda, Keishun Nakamura, Toshihiro Takeuchi, Kenta Nakamura, Hiroto Homma, Satoru Yajima and Yusuke Yoshida, Analysis of a current density diagnostic using a small Rogowski coil in the TST-2 spherical Tokamak, Plasma Conference 2014, 2014年11月18日~2014年11月21日, Toki Messe, Niigata, Japan
- V) Masateru Sonehara, Yoshihiko Nagashima, Akira Ejiri, Yuichi Takase, Hirokazu Furui, Naoto Tsujii, Takashi Yamaguchi, Takahiro Shinya, Hiroshi Togashi, Kazuhiro Imamura, Takuma Inada, Shintaro Tsuda, Keishun Nakamura, Kazuhiro Takeuchi, Hiroto Homma, Satoru Yajima, Yusuke Yoshida and Kenta Nakamura, Measurement of Temperature Fluctuation in TST-2 Spherical Tokamak by Langmuir Probe, Plasma Conference 2014, 2014年11月18日~2014年11月21日, Toki Messe, Niigata, Japan

- W) **永島芳彦**, 伊藤早苗, 藤澤彰英, 稲垣 滋, 小林達哉, 山田琢磨, 荒川弘之, 糟谷直宏, 佐々木真, M. Lesur, 小菅佑輔, 伊藤公孝, 非平衡極限 - 直線プラズマにおける乱流遷移の確率過程の観測, Plasma Conference 2014, 2014年11月18日~2014年11月21日, Toki Messe, Niigata, Japan
- X) **Yoshihiko Nagashima**, SANAE INOUE ITOH, Inagaki Shigeru, KAMATAKI, KUNIHIRO, H. Arakawa, Takuma Yamada, Naohiro Kasuya, M. Yagi, Akihide Fujisawa, K. Itoh, Investigation of Essential Nonlinear Processes in Plasma Turbulence, European Physical Society Plasma Physics (招待講演), 2013年07月01日~2013年07月05日, Espoo, Finland
- Y) **永島芳彦**, 伊藤早苗, 稲垣滋, 鎌滝晋礼, 荒川弘之, 糟谷直宏, 矢木雅敏, 藤澤彰英, 伊藤公孝, 空間積分データを用いた条件付き仕分けによる乱流実験解析, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年03月27日~2014年03月30日, 東海大学湘南キャンパス
- Z) **永島芳彦**, 伊藤早苗, 稲垣 滋, 鎌滝晋礼, 荒川弘之, 糟谷直宏, 矢木雅敏, 藤澤彰英, 伊藤公孝, 直線プラズマドリフト波乱流中の非線形力, プラズマ・核融合学会第30回年会, 2013年12月03日~2013年12月06日, 東京工業大学大岡山キャンパス

〔図書〕(計 1件)

- AA) 曾根原正晃 Fluctuation measurements over a broad region of low-field side edge plasma in the TST-2 spherical tokamak, 東京大学理学系研究科物理学専攻修士論文

〔産業財産権〕  
なし。

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K004384/research.html>

<http://fusion.k.u-tokyo.ac.jp/journalpapers.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

永島 芳彦 (Nagashima, Yoshihiko)  
九州大学・応用力学研究所・准教授  
研究者番号：90390632

### (2) 研究分担者

高瀬 雄一 (TAKASE, Yuichi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：70292828

江尻 晶 (EJIRI, Akira)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：30249966

### (3) 連携研究者

なし